

고상단결정법으로 성장시킨 $0.68\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.32PbTiO_3 압전단결정의 물성평가

Characterization of the Material Properties of $0.68\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.32PbTiO_3 Single Crystals Grown by the Solid-State-Crystal-Growth Method

이 상 한*, 노 용 래**
(Sang-han Lee*, Yongrae Roh**)

*경북대학교 기계공학과, **경북대학교 기계공학부

(접수일자: 2003년 9월 16일; 수정일자: 2003년 12월 29일; 채택일자: 2004년 1월 26일)

본 연구에서는 고상단결정법으로 성장시킨 PMN-32%PT 단결정의 모든 물성을 공진법을 이용하여 측정하였다. tetragonal 결정구조의 PMN-PT는 독립적인 물성으로 6개의 탄성상수, 3개의 압전상수, 2개의 유전상수를 가진다. 이상의 값들을 서로 다른 형태를 가진 6종류의 시편을 만들어 임피던스 분석기를 이용하여 각각의 시편의 진동모드별 전기임피던스를 측정하여 구하였다. 측정결과 일반 압전세라믹 보다 큰 전기기계결합계수 k_{33} (~85%)과 압전계수 d_{33} (~1200pC/N)을 가짐을 확인하였다. 측정된 값의 타당성은 측정시편의 유한요소해석을 통한 임피던스 스펙트럼과 상용 d_{33} -meter 측정결과와의 비교를 통해 확인하였다.

핵심용어: 고상단결정법, PMN-PT 단결정, 공진법, 진동모드, 압전기

투고분야: 초음파 및 탄성과 (4.1)

In this paper, all the materials constants of the PMN-32%PT single crystals grown by the solid state crystal growth method were measured by the resonance method. PMN-PT crystals of tetragonal symmetry have six elastic constants, three piezoelectric constants and two dielectric constants for their independent material constants. These materials constants were extracted from six sets of crystal samples of each different geometry to have different vibration modes respectively. Measured results showed that the crystal has larger electromechanical coupling factor k_{33} (~86%) and piezoelectric constant d_{33} (~1200pC/N) than conventional piezoceramics. Validity of the measurement was confirmed through comparison of the results with the impedance spectrum from finite element analysis of the samples and the results measured with a commercial d_{33} meter.

Keywords: SSCG method, PMN-PT single crystals, Resonance method, Vibration mode, Piezoelectricity

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.1)

1. 서론

지난 수십 년간 압전세라믹을 이용한 압전트랜스듀서, 압전센서, 압전액추에이터의 성능을 향상시키기 위한 많은 연구가 진행되어왔다. 이런 연구들은 주로 디바이스의 구조를 개선시켜 성능을 향상시키는 연구였다. 하지만 이러한 연구들은 압전세라믹이 가지는 특성의 한계에 의해 트랜스듀서의 성능향상에 한계가 있어왔다. 최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존의 우수한 압전

특성을 가진 압전단결정을 개발하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이 가운데 PMN-PT압전단결정은 기존의 압전세라믹 PZT보다 월등히 좋은 압전특성을 지니고 있어 PZT를 대체할 수 있는 재료로 주목 받고 있다[1].

단결정 PMN-PT를 성장시키는 방법에는 대표적으로 Flux, Bridgman방법과 고상단결정 (SSCG-Solid State Crystal Growth)법 등이 있다. Flux, Bridgman방법은 PMN-PT를 이루는 성분을 고온에서 액체상태로 용융시킨 다음 작은 단결정핵으로부터 성장시키는 방법으로서, 값비싼 백금용기와 외부 불순물로부터의 오염을 막는 밀봉작업이 필요하다[2,3]. 하지만 고상단결정법은 PMN-PT분말을 혼합한 다음 단결정 시드를 부착시킨 후, 소결과정을

책임저자: 이상한 (yryong@knu.ac.kr)
702-701 대구광역시 북구 선격동 1370
경북대학교 기계공학과
(전화: 053-943-8716; 팩스: 053-950-6550)

거침으로써 단결정으로 성장시키는 방법이다. 이러한 방법은 성장 비용이 적게 들고, 대량생산이 가능하며, 화학적으로 균질한 상태의 단결정을 성장시킬 수 있다[2,3]. 앞서 말한 방법들에 의해 성장된 PMN-PT는 성장방법에 따라 공극함유량 및 내부특성이 달라져 압전특성이 달라지게 된다. 이러한 압전 단결정을 압전트랜스듀서에 이용하기 위해서는 각각의 성장방법에 따른 단결정의 물성 측정이 선행되어야 한다. Flux, Bridgman방법으로 성장시킨 PMN-PT의 물성은 이미 측정결과가 보고된 바 있다 [4]. 하지만 SSSCG방법으로 성장시킨 PMN-PT의 물성은 측정사례가 없다.

압전체의 물성을 평가하는 방법에는 공진법[5], 초음파를 이용한 방법[5-7], 특정한 상수측정장치를 이용하는 방법 등이 있다. 초음파를 이용한 방법과 특정 상수측정장치를 이용하는 방법은 물성값 전체를 구할 수 없고, 측정방법이 복잡하다. 하지만 공진법은 이미 많은 선행 연구를 통해 시편의 진동모드별 공진 주파수 및 반공진 주파수를 이용해 물성을 구할 수 있는 이론적 수식 및 실험적 측정방법이 잘 알려진 방법이며, 측정값이 정확하고, 전체 물성값을 구할 수 있다는 장점을 지닌다. 따라서 본 연구에서는 고상단결정법으로 성장시킨 0.68Pb (Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.32PbTiO₃ 단결정의 물성을 공진법을 이용하여 측정하였다. 이후의 내용에서 0.68Pb (Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.32PbTiO₃는 PMN-32%PT로 표기하겠다. 본 연구에서 제시하는 고상단결정법으로 성장시킨 PMN-32%PT단결정의 물성은 이 단결정을 이용하여 새로 온 디바이스를 설계하고 해석할 때의 물성자료로 사용될 수 있을 것이다.

II. 측정과정

PMN-PT는 PMN과 PT의 성분비 조성식 (1-x)PMN-x%PT에 따라 결정구조를 달리하는데 PT의 성분비인 x값에 의해 tetragonal과 rhombohedral의 결정구조를 형성하게 된다[8]. 그리고 각각의 결정구조에 따라 물성값이 달라지게 된다[9]. 본 연구에서는 Morphotropic phase boundary부근에서 tetragonal 결정구조에 속한 PMN-32%PT의 물성을 측정하였다.

Tetragonal 결정구조를 가지는 PMN-PT의 물성은 식 (1)과 같이 탄성 (compliance)상수행렬에서 6개의 독립상수 $s_{11}^E, s_{12}^E, s_{13}^E, s_{33}^E, s_{44}^E, s_{56}^E$ 를 가지며, 압전상수행렬에서 3개의 독립상수 d_{15}, d_{31}, d_{33} 을 가지며, 유전상수

행렬에서 2개의 독립상수 $\epsilon_{11}^T, \epsilon_{33}^T$ 를 가진다[9]. 여기서 s_{ij}^E 는 전계 (E)가 일정한 상태에서의 compliance constant를, d_{ij} 는 압전상수를, ϵ_{ij}^T 는 응력 (T)이 일정한 상태에서의 유전율을 의미한다. 따라서 tetragonal 결정구조의 PMN-PT는 총 11개의 독립상수를 가진다.

$$[s^E] = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{56}^E \end{bmatrix}$$

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[\epsilon^T] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix}$$

물성측정을 위해 각 진동모드별로 그림 1과 같이 총 6 종류의 시편을 제작하였다. 각각의 시편은 발생하는 진동모드에 따라 이름을 붙였다[10]. 표 1은 제작된 시편의 크기를 나타낸다. 표 1에서 x, y, z는 시편들의 각 방향별 크기를 나타낸다. 시편의 크기는 각 시편에서 보고자 하는 진동모드가 우세하게 발생할 수 있도록 설정하였다. 예를 들어 TE시편은 Thickness Extensional의 약자로서, 두께방향의 진동모드를 측정하기 위한 시편을 의미한다. 그림 1에서 LTE_{xy} 시편은 장축방향이 X-Y평면에서 X축으로부터 θ_{xy} 만큼 회전된 시편을 의미한다. LTE_{xz} 시편은 TS시편과 같이 전극면과 플링면이 직각인 시편이며, 시편의 장축방향이 X-Z평면에서 X축으로부터 θ_{xz} 만큼 회전된 시편을 나타낸다.

그림 1에 나타난 시편방향과 분극방향을 가지도록 제작된 시편들로부터 임피던스 분석기 (HP 4194A)를 이용하여 각각의 임피던스 스펙트럼을 구함으로써, 공진주파수 (f_r)와 반공진 주파수 (f_a)를 측정한다. TE, LE, TS시편의 공진 주파수 (f_r)와 반공진 주파수 (f_a)를 측정하여 TE시편으로부터 $c_{33}^D, c_{33}^E, k_t, \epsilon_{11}^T$ 를 [5,11], LE시편으로부터 $s_{33}^D,$

표 1. 물성측정용 PMN-PT시편 크기
Table 1. Dimensions of the experimental PMN-PT samples.

Dimension	LTE _{xy}	LTE _{xz}	LE	TE	TS
x (mm)	5.55	5.4	0.9	4.95	6.4
y (mm)	1.38	1.5	0.9	4.95	0.45
z (mm)	0.57	0.5	4.5	0.84	4.8

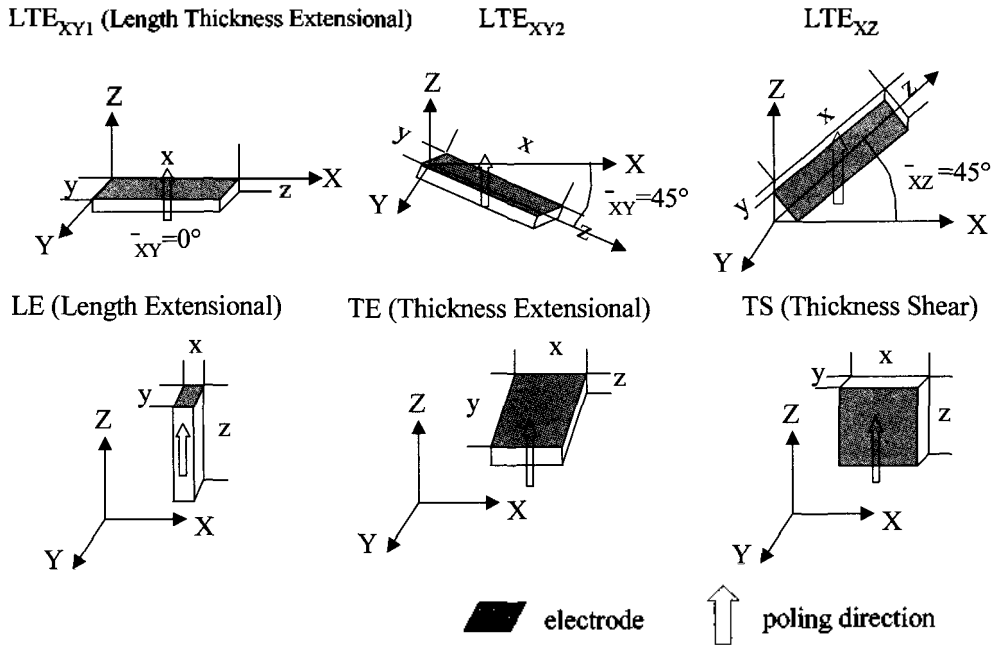


그림 1. 물성상수를 측정하기 위한 PMN-32%PT 시편형상 (X, Y, Z: 결정축 방향, x, y, z: 각 방향 규격)

Fig. 1. PMN-32%PT sample geometries for characterization of material constants (X, Y, Z: the coordinate of crystal, x, y, z: the dimension of each direction).

s_{33}^E , d_{33} , k_{33} 을 [11,12], TS시편으로부터 s_{44}^D , s_{44}^E , d_{15} , k_{15} , ϵ_{11}^T 를 [11,12] 측정한다. 여기에서 s_{ij}^D 는 전기변위가 일정한 상태에서의 compliance constant를 의미하며, c_{ij}^E 는 전계가 일정한 상태에서의 stiffness constant를, c_{ij}^D 는 전기변위가 일정한 상태에서의 stiffness constant를, k 는 전기기계결합계수를 의미한다.

나머지 독립상수들은 LTE_{XY} 와 LTE_{XZ} 를 이용하여 측정한다. 그림 2에서 $\theta_{XY}=0^\circ$ 인 시편을 LTE_{XY1} , $\theta_{XY}=45^\circ$ 인 시편을 LTE_{XY2} 라 부른다. LTE_{XY1} 시편의 공진주파수 (f_r)를 식 (2)에 대입하여 s_{11}^E 를 측정하며, LTE_{XY2} 시편의

공진주파수 (f_r')를 식 (3)에 대입하여 s_{11}^E 를 측정한다.

$$s_{11}^E = \frac{1}{4\rho x^2 f_r^2} \quad (2)$$

$$s_{11}^E = \frac{1}{4\rho x^2 (f_r')^2} \quad (3)$$

앞서 구한 s_{11}^E 와 s_{11}^E 를 식 (4)에 대입하여 $(2s_{12}^E + s_{66}^E)$ 값을 구한다[13].

$$(2s_{12}^E + s_{66}^E) = 4s_{11}^E - 2s_{11}^E \quad (4)$$

그림 2에서 $\theta_{XZ}=45^\circ$ 인 시편을 LTE_{XZ} 라 부르며, LTE_{XZ} 시편의 공진주파수 (f_r'')를 식 (5)에 대입하여 s_{11}^E 를 측정한다.

$$s_{11}^E = \frac{1}{4\rho x^2 (f_r'')^2} \quad (5)$$

이렇게 구한 s_{11}^E , $(2s_{12}^E + s_{66}^E)$, s_{11}^E 값과 LE시편에서 구한 s_{33}^E , TS시편에서 구한 s_{44}^E 를 식 (6)에 대입하여 s_{13}^E 를 구한다[13].

$$s_{13}^E = 4s_{11}^E - \frac{1}{4} [s_{11}^E + (2s_{12}^E + s_{66}^E)] - \frac{1}{2} (s_{33}^E + s_{44}^E) \quad (6)$$

앞서 구한 s_{11}^E , s_{13}^E 와 LE시편에서 구한 s_{33}^E , TE시편에

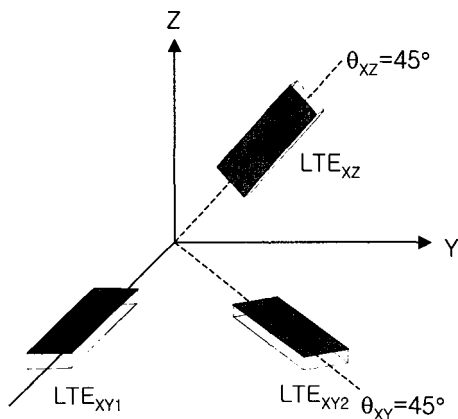


그림 2. 물성측정용 LTE_{XY} , LTE_{XZ} 시편의 제작[13]

Fig. 2. Geometry of the LTE_{XY} and LTE_{XZ} sample for measurement[13].

서 구한 c_{33}^E 를 식 (7)에 대입하여 s_{12}^E 를 구한다[4].

$$s_{12}^E = -s_{11}^E + \frac{2s_{13}^E}{\left(s_{33}^E - \frac{1}{c_{33}^E}\right)} \quad (7)$$

s_{12}^E 가 구해지면 앞서 구한 ($2s_{12}^E + s_{66}^E$)값을 이용하여 s_{66}^E 를 구한다. 나머지 d_{31} , k_{31} 은 LTE_{XVI} 시편의 공진주파수와 반공진 주파수를 이용하여 구한다[11,12]. 이상의 과정을 거침으로써, $[s^E]$, $[d]$, $[\epsilon^T]$ 의 값을 모두 구할 수 있다.

III. 측정결과 및 고찰

그림 1에 나타난 시편을 절단기 (Buehler ISOMET)와 연마기 (Buehler METASERV 2000)를 이용하여 표 1에 나타난 크기로 가공하여 시편을 제작한 다음 앞서 설명한 방법을 이용하기 위해 각각의 시편의 임피던스곡선을 측정하였다. 그림 3은 일례로 임피던스 분석기를 이용하여 측정된 TE시편의 임피던스를 나타낸다. 그림 3에서 공진주파수 f_r 과 f_a 를 구할 수 있다. 이 값들을 이용하여 구한 PMN-32%PT의 물성을 표 2에 나타내었다. 표 2에는 본 연구에서 측정된 고상단결정법으로 성장시킨 PMN-2%PT 물성과 비교하기 위해 Bridgman방식으로 성장시킨 PMN-33%PT의 물성과 PZT의 물성도 동시에 보였다 [4,11]. 표 2를 통해 고상단결정법으로 성장시킨 PMN-

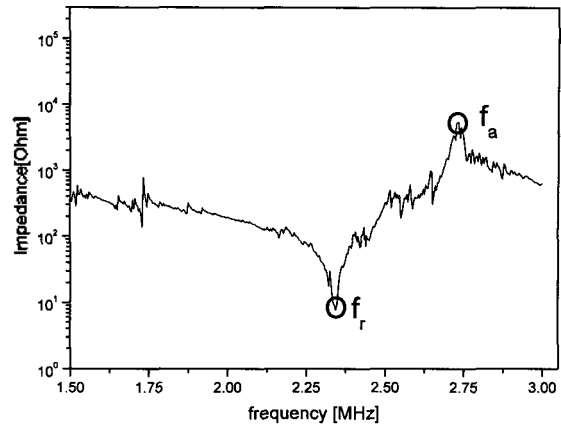


그림 3. TE시편의 임피던스곡선과 공진, 반공진주파수
Fig. 3. Impedance spectrum of the TE sample, resonance frequency and anti-resonance frequency.

2%PT의 경우 탄성상수와 압전상수값이 Bridgman방식으로 성장시킨 PMN-33%PT보다 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 고상단결정법의 특성상 결정내부의 공극함유량이 Bridgman방식보다 많아져서 생기는 현상으로 볼 수 있다[2,3]. 그러나 기존에 널리 사용되는 압전세라믹인 PZT보다는 훨씬 높은 전기기계결합계수 k_{33} (~86%)과 압전상수 d_{33} (~1200pC/N)을 가짐을 알 수 있다.

표 2에 나타난 물성값의 타당성을 입증하기 위해, 유한요소해석과 d_{33} -meter (Pennebaker Model 8000 Piezo d_{33} -Tester)를 이용하여 물성분석을 하고 그 결과와 공진법으로 구한 물성값을 비교하여 보았다. 먼저 유한요소해석법을 이용하여 앞서 제시한 그림 1의 물성측정용 시

표 2. SSCG PMN-32%PT, Bridgman PMN-33%PT와 PZT-5H물성비교

Table 2. Comparison of the properties of SSCG PMN-32%PT, Bridgman PMN-33%PT and PZT-5H.

constant	units	Bridgman PMN-33%PT[8]	SSCG PMN-32%PT	PZT-5H[6]
s_{11}^E	$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	69.0	47.7	16.4
s_{12}^E		-11.1	-13.1	-5.32
s_{13}^E		-55.7	-24.4	-7.52
s_{33}^E		119.6	43.4	20.3
s_{44}^E		14.5	19.0	49.8
s_{66}^E		15.2	62.8	43.5
d_{15}		$\times 10^{-12} \text{ C/N}$	146	311.2
d_{31}	-1330		-685.6	-263
d_{33}	2820		1190.4	515
$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$		1600	2467.8	2778
$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$		8200	4975.1	3170
k_{15}		0.32	0.48	0.664
k_{31}		0.59	0.47	0.387
k_{33}		0.94	0.86	0.683
k_t		0.64	0.57	0.505

편과 동일한 형상, 크기로 모델을 제작한 후, 본 연구에서 측정된 물성을 모델에 대입하여 임피던스 특성을 구해 보았다. 본 유한요소해석에서는 tetragonal 결정구조를

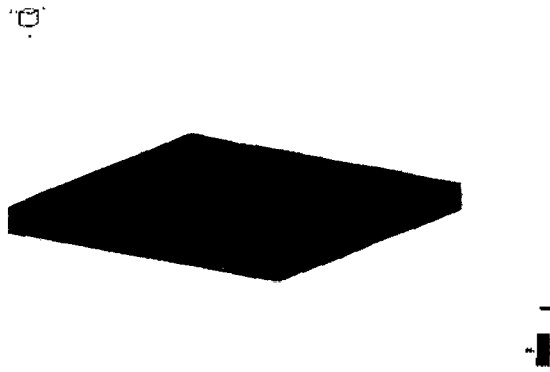


그림 4. TE sample용 유한요소모델
Fig. 4. The TE sample model for finite analysis.

따르되 측정된 구체적인 물성치가 서로간에 일관성이 있는가 하는 것을 확인하고자 유한요소 해석을 수행하였다. 측정된 물성값들이 정확하다면 유한요소해석을 통한 임피던스 스펙트럼이 측정된 스펙트럼과 잘 일치할 것이고, 측정치에 오류가 많다면 그 만큼 두 스펙트럼이 서로 차이를 보일 것이다[10,14]. 그림 4는 일례로 TE시편 분석용으로 제작된 유한요소 모델을 보인다. 유한요소 해석은 상용 도구인 PZflex를 이용하여 수행하였다. 그림 5~8은 물성측정에 사용된 시편의 측정 임피던스 곡선과 유한요소 해석 임피던스 곡선을 비교한 것이다. 비교결과, 두 스펙트럼이 상당히 우수한 일치를 보였다. 그림 7의 LTE_{XY} 시편의 곡선에서 두 곡선이 약간의 오차를 보이는데, 이것은 LTE_{XY} , LTE_{XZ} 시편을 $\theta_{XY} = 45^\circ$, $\theta_{XZ} = 45^\circ$ 로 가공하는 과정에서 발생한 오차로 인한 것으로 추정된다. 또 다른 검증 방법으로 상용 d_{33} -meter를 이용하여 d_{33} 을 측정하여 표 3에 나타난 바와 같이 비교하였다.

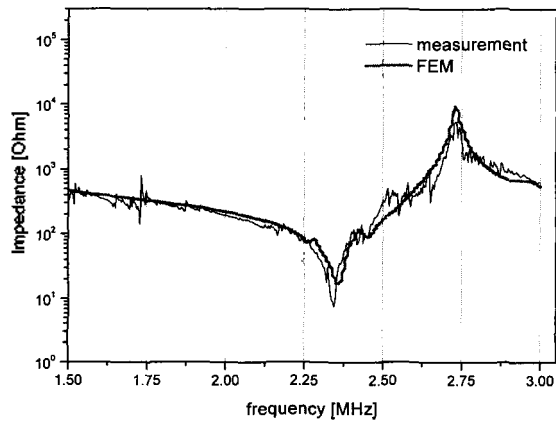


그림 5. TE시편의 measurement, FEM임피던스곡선 비교
Fig. 5. Comparison of the measured and calculated impedance spectrum of the TE sample.

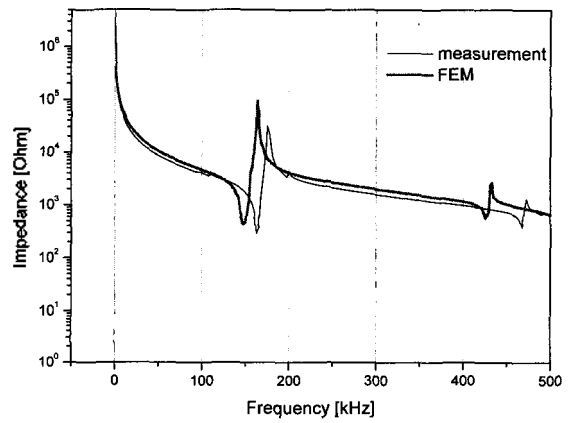


그림 7. LTE_{XY} 시편의 measurement, FEM임피던스곡선 비교
Fig. 7. Comparison of the measured and calculated impedance spectrum of the LTE_{XY} sample.

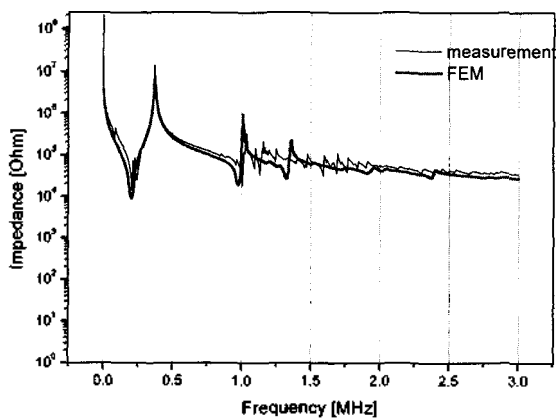


그림 6. LE시편의 measurement, FEM임피던스곡선 비교
Fig. 6. Comparison of the measured and calculated impedance spectrum of the LE sample.

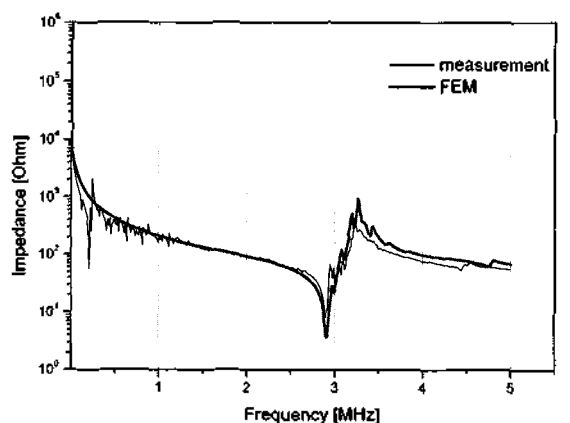


그림 8. TS시편의 measurement, FEM임피던스곡선 비교
Fig. 8. Comparison of the measured and calculated impedance spectrum of the TS sample.

표 3. TE시편에 의한 d_{33} 측정결과 비교Table 3. Comparison of the measured and calculated d_{33} of the TE sample.

measurement method	d_{33}
d_{33} -meter	$1260 \times 10^{-12} \text{ C/N}$
Resonance method	$1190 \times 10^{-12} \text{ C/N}$

표 3에서 두 값이 거의 일치하나 약 5.9%의 오차를 보이고 있는데, 이는 측정주파수의 차이에 크게 기인하는 것으로 판단된다. 즉 동일한 TE시편에 대해 공진법으로 측정된 d_{33} 은 그림 5와 같이 약 2.37 MHz에서 측정되었고, d_{33} -meter에 의한 측정은 측정기의 한계로 인해 1kHz에서 측정이 되었으므로 이만큼의 차이를 보이는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 측정주파수의 차이로 인한 오차를 고려한다면, 표 3의 두 결과는 상당히 잘 일치한다고 할 수 있다. 이상의 실험은 d_{33} 을 PMN-PT의 여러 상수들 중의 하나로서 비교 측정을 한 경우로서, 다른 상수들도 d_{33} 과 유사한 정도의 정확성을 가진다고 판단된다. 이상의 두 가지 방법으로 공진법을 통한 물성값이 타당함을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 고상단결정법으로 성장시킨 tetragonal 결정구조의 PMN-32%PT 압전단결정의 모든 물성을 측정하였다. 공진법으로 측정된 물성값들의 타당성은 유한요소해석을 통한 각 시편들의 임피던스 분석결과와 상용 d_{33} -meter를 이용한 측정값들과 비교함으로써 확인하였다. 측정 결과에 의하면 고상단결정법으로 성장시킨 PMN-32%PT의 압전특성은 기존의 압전세라믹 (PZT)보다는 월등히 좋음을 확인할 수 있었으나, 기 발표된 Bridgman법에 의해 성장시킨 단결정[4]에 비해서는 어느 정도 떨어지는데, 이는 결정내의 공공함유량이 높기 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 고상단결정법을 이용하여 성장시킨 PMN-32%PT 단결정은 기존의 압전세라믹 디바이스보다 더 우수한 성능을 제공할 수 있고, 본 연구에서 측정된 물성은 이 단결정을 이용한 디바이스를 개발할 때 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. S. E. Park, and W. Hackenberger, "High performance single crystal piezoelectrics : applications and issues," *Current Opinion in Solid state and Materials Science*, 6, 11-18, 2002.
2. A. W. Vere, *Crystal growth: principles and progress*, (Plenum Press, 1987).
3. B. R. Pamplin, *Crystal growth*, (Pergamon Press, 1975).
4. R. Zhang, B. Jiang and W. Cao, "Elastic, piezoelectric and dielectric properties of multidomain 0.67Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.33PbTiO₃ single crystals," *J. Appl. Phys.*, 90 (7), 3471-3475, 2001.
5. W. Jiang, R. Zhang, B. Jiang and W. Cao, "Characterization of piezoelectric materials with large piezoelectric and electromechanical coupling coefficients," *Ultrasonics*, 41, 55-61, 2003.
6. 노용래, "PVDF 복소수 탄성, 유전, 압전 상수 측정," *한국음향학회지*, 10 (5), 66-68, 1991.
7. 김진오, "표면탄성파 전파속도 측정에 의한 초격자 의한 초격자 다층박막의 유효탄성계수결정," *한국음향학회지*, 19 (5), 41-45, 2000.
8. Z. G. Ye and M. Dong, "Morphotropic domain structures and phase transitions in relaxor-based piezo-ferroelectric (1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-xPbTiO₃ single crystals," *J. Appl. Phys.*, 87 (5), 2312-2319, 2000.
9. J. F. Nye, *Physical properties of crystals*, (Oxford University Press, 1985).
10. D. J. Powell, G. L. Wojcik, C. S. Cesillets, T. R. Gururaja, K. Guggenberger, S. Sherril and B. K. Mukherjee, "Incremental model-build-test Validation Exercise for a 1-D Biomedical ultrasonic imagine array," *IEEE Ultrason. Sym.*, 1669-1674, 1997.
11. S. Zhu, B. Jiang and W. Cao, "Characterization of piezoelectric materials using ultrasonic and resonant techniques," *SPIE*, 4431, 154-162, 1998.
12. IEEE Standard on Piezoelectricity, *IEEE Ultrason. Ferro. and Freq. Contr. Soc.*, ANSI/IEEE Std 176-1987.
13. T. Ikeda, *Fundamentals of piezoelectricity*, (Oxford University Press, 1996).
14. M. J. Zipparo and C. G. Oakley, "Finite Element Modeling of PZN-PT and PMN-PT Single Crystal Material," *IEEE Ultrason. Sym.*, 1017-1022, 2001.

저자 약력

● 이상한 (Sang-han Lee)

2002년 2월: 계명대학교 기계공학과 (학사)

2004년 2월: 경북대학교 기계공학과 (석사: 음향진동공학)

2004년 2월~현재: (주)초음파기술 연구원

* 주관심분야: PMN-PT 단결정, 초음파 변환기, 소음 및 진동

● 노용래 (Yongrae Roh)

한국음향학회지 제10권 제5호 참조